



# Modelagem do Decaimento da Magnetização Normalizada através da Resposta de Ressonância Magnética Nuclear (RMN).

Gleide A. N. Dias\*, IGEO/UFRJ, Brazil

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

## Abstract

Checks of the magnetization decay were simulated using the method of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) in order to contribute to the study of petrophysical properties of rocks through three-dimensional images. The data used were a sample of sandstone and four synthetic models. The ability of the method random walker (walker or random walk) to simulate the decay of magnetization in the pores of complex geometry has allowed to simulate the pore-scale response NMR. The reaction-diffusion equation is the basis for modeling of the NMR response. The relaxation mechanisms of surface relaxation and bulk relaxation due to diffusion in a magnetic field gradient can be modeled independently. With the results of the simulation of both the image obtained by micro-CT and variation structure matrix was observed that besides the shape of empty space between the grains of the porous medium may influence the responses of the synthetic data.

## Introdução

A RMN é um fenômeno físico fundamentado nas propriedades magnéticas quânticas do núcleo de um átomo. Para as propriedades do momento magnético angular do átomo e do elétron em torno do núcleo podemos admitir que o movimento de giro do próton em torno de seu próprio eixo represente o spin. Juntamente com o spin existe outra propriedade o momento magnético, no qual este se comporta como um pequeno ímã. Como para toda partícula carregada em movimento acelerado surge um campo magnético associado ao próton de hidrogênio e se comporta com um dipolo. Quando um próton ou um conjunto de prótons é colocado sobre a ação de um campo magnético intenso temos o alinhamento deste dipolos ou de spin de forma que o comportamento randômico agora apresenta-se alinhados todos os dipolos. Quando se retira o campo o núcleo excitado retorna ao equilíbrio liberando energia para o ambiente, processo conhecido como relaxação, que ocorre por meio da relaxação spin-rede da relaxação spin-spin as quais são definidas por duas constantes exponenciais de tempo T1 (tempo de recuperação do campo longitudinal) e T2 (tempo de decaimento do sinal na bobina) (Silva, 2004). Segundo Dastidar (2004) o primeiro experimento foi realizado por Bloch *et al.* (1946) e Carr and Purcell (1954), inicialmente este fenômeno

físico foi usado na espectroscopia. Desde da década de 50 este método tem sido extensivamente usado na indústria do petróleo para determinar vários parâmetros petrofísicos tais como porosidade, saturação de água irreduzível, molhabilidade e inferindo a permeabilidade.

As propriedades das rochas são usualmente preditas usando imagens bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D) de microestruturas. Existem dois tipos de métodos para gerar uma imagem 3D do espaço poroso. A primeira é a imagem direta, que produz imagens 3D através do mapeamento do interior da estrutura de uma amostra real de rocha, tal como uma abordagem destrutiva de corte 2D e não-destrutiva de raios-X através da microtomografia (micro-CT). Para a segunda categoria inclui vários métodos de reconstrução para a elaboração de imagens sintéticas 3D de alta resolução a partir de seções finas 2D utilizando métodos estatísticos ou simulação de processos geológicos (Hu Dong, 2007).

A resposta da RMN é simulada usando o movimento Browniano descrito pelo modelo matemático conhecido como modelo de caminhante aleatório (*walker* ou *random walk*) (Nhalusse (2005). Em Talabi (2008) para obter a resposta da simulação do método de RMN, cada um dos mecanismos de relaxação de superfície, relaxação de volume e relaxação devido à difusão de um gradiente de campo magnético devem ser modelados de forma independente uma vez que todos eles ocorrem de forma independente e simultaneamente. A equação de reação-difusão é a base para a modelagem dos mecanismos de relaxação de superfície e relaxação de volume.

## Método de Modelagem NMR

A resposta da RMN em um meio poroso assumindo gradiente não magnético pode ser modelado por uma equação de reação-difusão dada por

$$\frac{\delta[M]}{\delta t} = D \nabla^2 [M] - \frac{[M]}{T_{2b}} \quad (1)$$

Com condições inicial e de fronteira

$$[M] = [M_0] \text{ em } t=0 \text{ e } Dn \cdot \nabla^2 [M] = \rho [M] \quad (2)$$

Onde [M] é a magnetização por unidade de volume  $\rho$  é a relaxação de superfície e D é o coeficiente de difusão. Se a estrutura do meio poroso é conhecida, então, uma solução direta da Eq.1 pode ser usado para estimar o decaimento da magnetização para simples formas de poros, como esfera, cilindro, cubo ou paralelepípedo retangular, soluções analíticas podem ser obtidas para o decaimento da magnetização em função do tempo em um poro esférico de raio r dada por:

$$M(t) = M_0 \exp\left(\frac{-t}{T_{2B}}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6L \exp\left(-\frac{\beta_n^2 D t}{r^2}\right)}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + L^2 - L)} \quad (3)$$

Onde  $\beta_n$  é a raiz de  $\beta_n \cot \beta_n + L - 1 = 0$  e  $L = \rho r / D$ . No rápido limite de difusão ( $L \ll 1$ ) tem-se,

$$M(t) = M_0 \exp\left(\frac{-t}{T_2}\right) \quad (4)$$

Onde  $M_0$  é a magnetização transversal inicial em tempo  $t=0$  e  $T_2$  é a taxa de decaimento. Para o poro de forma esférica tem-se

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{3\rho}{r} \quad (5)$$

Para um meio poroso composta de poros interconectados de diferentes tamanhos e formas é muito mais adequado para descrever o decaimento da magnetização por

$$M(t) = M_0 \sum_{i=1}^r a_i \exp\left(\frac{-t}{T_{2i}}\right) \quad (6)$$

$a_i$  é a fração volume de poro de tamanho  $i$  que decai com tempo de relaxação  $T_{2i}$ . Usualmente a média logarítmica é usada para determinar o tempo de relaxação transversal médio,  $T_{2im}$

$$T_{2im} = \exp\left(\frac{\sum a_i \log T_{2i}}{\sum a_i}\right) \quad (7)$$

Para simples formas de poros, como esfera, cilindro, cubo ou paralelepípedo retângular, soluções analíticas podem ser obtidas para o decaimento da magnetização. Modelagem da relaxação de superfície

A equação de reação-difusão (1) foi resolvido por um método de *random walker*. Inicialmente, os *walkers* são colocados aleatoriamente no espaço do poro. A passo de cada instante, os *walkers* propaga-se de suas posições iniciais  $[x(t), y(t), z(t)]$ , para uma nova posição  $[x(t+\Delta t), y(t+\Delta t), z(t+\Delta t)]$  na superfície de uma esfera com raio,  $s$  é centrado em suas posições iniciais. O tempo que leva para propagar-se a distância  $s$  é dada por

$$\Delta t = \frac{s^2}{6D} \quad (8)$$

$s^2$  é a distância média quadrática de um molécula propagar-se em tempo  $t$ , e  $D$  é o coeficiente de difusão molecular o qual é uma propriedade do fluido e é dependente de temperatura e viscosidade. Durante o movimento aleatório das moléculas em um fluido, os prótons nestas moléculas colidem com a superfície dos poros e, conseqüentemente, relaxam assim contribuem tanto para a relaxação transversal e longitudinal.

Se o *walker* encontra uma superfície sólida, ele é eliminado com uma probabilidade  $\delta$ . Se o *walker* se mantém, ele simplesmente salta para fora da superfície e retorna à sua posição anterior, e o tempo é avançada por passos de tempo dado na Eq.8. Em cada passo de tempo um registro da fração dos *walkers* existentes é verificada por

$$P(t) = \frac{N_t}{N_0} = \frac{M_t}{M_0} = \exp\left(\frac{-3\rho t}{r}\right) \quad (9)$$

$N_t$  é o número de *walkers* existentes no tempo  $t$  e  $N_0$  é o número de *walkers* iniciais em tempo  $t=0$ .  $P(t)$  é análogo amplitude normalizada devido ao mecanismo da superfície de relaxação em medidas NMR. Uma direta substituição da relaxação de superfície  $P$  e o raio  $r$  do poro da esfera fornece o decaimento da magnetização em função do tempo.

#### Modelagem da relaxação de *bulk*

A relaxação de volume é modelada multiplicando-se a decaimento da magnetização devido ao mecanismo da relaxação de superfície e relaxação devido difusão em gradientes magnéticos pelo decaimento exponencial,

$$b(t) = \exp\left(\frac{-t}{T_{2B}}\right) \quad (10)$$

#### Modelagem da relaxação por difusão

O decaimento adicional de amplitudes de spin ecos como um resultado da difusão em gradientes de campo magnético depende dos intervalos de tempo entre estes spin ecos  $2\Delta t$ . Este adicional decaimento pode ser expresso como uma função de tempo e como um fator multiplicativo.

$$g(t) = \exp\left(-\gamma^2 G_s^2 D_0 (\Delta t)^2 t\right) \quad (11)$$

Onde  $t$  é o tempo,  $D_0$  é o coeficiente molecular de auto-difusão do fluido,  $\gamma$  é a razão giromagnético do próton e  $G_s$  é o gradiente espacial da intensidade do campo magnético

#### Modelagem de todos os mecanismos

A amplitude de magnetização total em função do tempo é dada por

$$M(t) = M_0 [P(t)g(t)b(t)] \quad (12)$$

#### Exemplos

Para a verificação da resposta do decaimento da magnetização foi utilizado a imagem de um arenito obtido através do micro-CT disponível em *Imperial College London* (<http://www3.imperial.ac.uk>). O arquivo utilizado foi um texto ASCII com a descrição dos dados de micro-CT que é a representação de uma matriz 3D refletindo as informações do volume da amostra inspecionada. O arquivo é binarizado em preto (vazio - 0) e branco (sólido - 1). A amostra foi visualizada em 2D e 3D através do programa ImageJ desenvolvido no *Imperial College London*, Fig. 1 representa uma amostra de arenito com resolução de  $5\mu m$  e voxel de tamanho  $300^3$ . Da mesma forma como realizado por Talabi (2008) o decaimento da magnetização no poro cúbico e sua equivalente imagem discretizada foi simulada usando um fluido com difusão

de  $2,09 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , relaxação de superfície de  $15 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ , intervalo de tempo de  $3,3 \mu\text{s}$  e 1000 *walkers*. Neste estudo o efeito do decaimento da magnetização foi verificado para vóxeis de tamanhos variados representados por matrizes e suas porosidades em  $300^3$ ,  $200^3$ ,  $100^3$ ,  $50^3$ ,  $40^3$ ,  $30^3$ ,  $20^3$ ,  $10^3$ ,  $9^3$ ,  $5^3$ . (Fig.2).

Na Fig. 2 foram simulados 4 secções a fim de caracterizar a porosidade de uma rocha sendo que os demais parâmetros foram utilizados o do modelo da (Fig.1), sendo que estes representam uma porosidade de 50% e suas formas não seguem um padrão típico de grão de rocha. Estas secções foram elaboradas em forma de matriz  $1600 \times 40$  a fim de caracterizar uma imagem voxel  $40^3$ . Pode ser verificado que a variação da forma da estrutura da rocha em relação ao grão (branco) e o poro (preto) são alterados por linhas e colunas.

### Resultados

Na Fig. 3 pode-se observar que para a imagem voxel de tamanho  $300^3$  o tempo de decaimento da magnetização é muito mais lento do que o de tamanho  $20^3$  que decai muito mais rápido do que os demais tamanhos estudados, ao contrário de Talabi (2008) no decaimento da magnetização nas imagens voxel  $100^3$  e  $200^3$  decai mais rapidamente que  $300^3$ , esse fato deve estar relacionado a escala utilizada por Talabi (2008) semi-logarítmica e a usada neste estudo logarítmica como também ao intervalo utilizado.

Na Fig. 4 é observado que em (a) e (b) o decaimento da magnetização é mais acentuado do que (c) e (d). Entre as Figs. (a) e (b) é notado que em (a) a resposta do decaimento da magnetização é mais lenta do que (b) da mesma forma o decaimento da magnetização é mais lento em (c) do que em (d). Pode ser observado que mesmo com o mesmo valor de porosidade decaimento da magnetização foi influenciado pela estrutura do modelo.

### Conclusões

A resposta da simulação RMN para o decaimento da magnetização normalizada foram influenciados com o dado real pela redução do tamanho do voxel por consequentemente pela variação da porosidade e no dado sintético pela variação abrupta da forma da estrutura

do grão apesar de ser utilizado o mesmo valor de porosidade. Nas respostas dos dados sintético verificou-se que o decaimento da magnetização normalizada é influenciada para um mesmo volume de rocha com diferentes estruturas.

### Agradecimentos

Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Setor de Geofísica

### Referências

Dastidar R. 2004. Integrating NMR with other petrophysical parameters to characterize a turbidite reservoir. Thesis approved for the Mewbourne school of petroleum and geological engineering

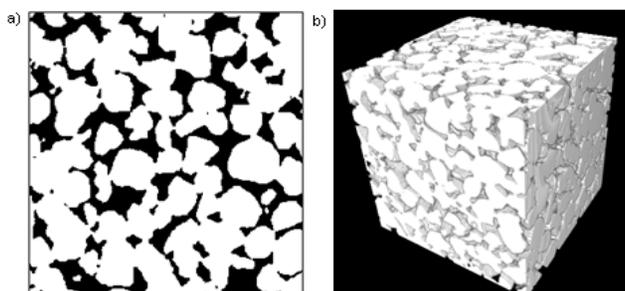
Hu dong. 2007. Micro-CT imaging and Pore Network Extraction. A dissertation submitted to the Department of Earth Science and Engineering of Imperial College London in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Of Doctor Of Philosophy.

<http://www3.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/research/perm/porescalemodelling/micro-ct%20images%20and%20networks/>

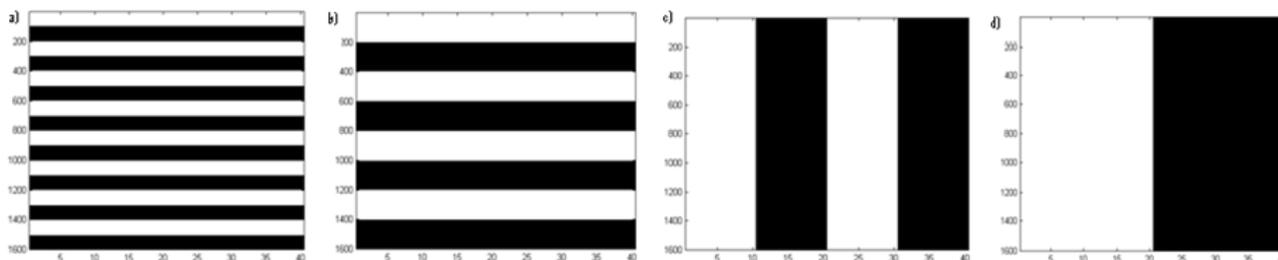
Nhalusse D. R. 2005. Caminhante Aleatório (Random Walk) e processos de Difusão em um Campo Externo. Universidade Eduardo Mondlane. Faculdade de Ciências. Departamento de Física. Trabalho de Licenciatura

Talabi O. A. September, 2008. Pore-Scale Simulation of NMR Response in Porous Media. A dissertation submitted to the Department of Earth Science and Engineering of Imperial College London in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Of Doctor Of Philosophy.

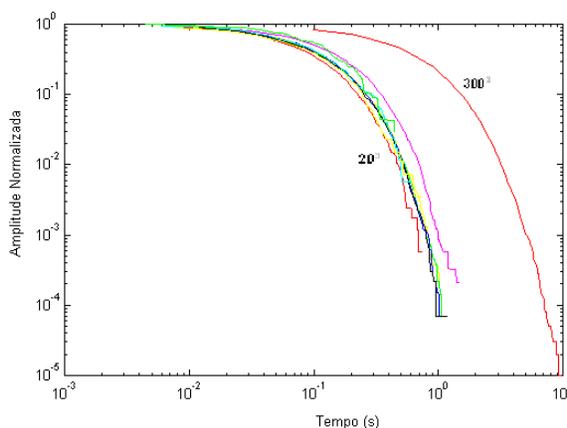
Silva C. R. V., 2010. Compreendendo a Ressonância Magnética. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP). Faculdade de Física, Matemática e Tecnologia. Monografia apresentada ao Curso de Física Médica.



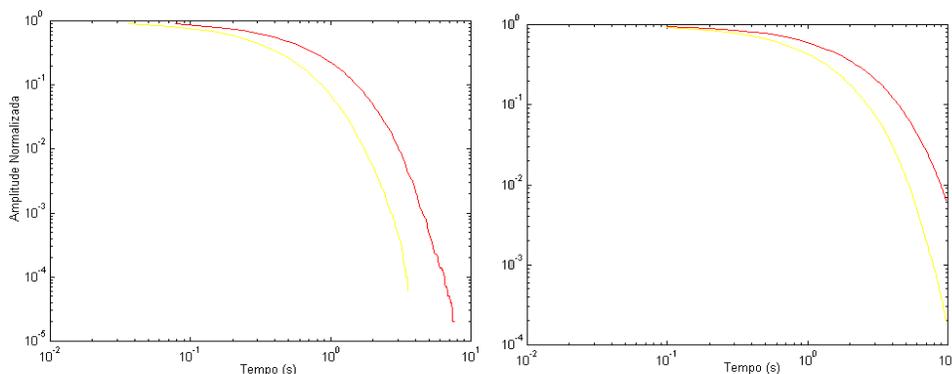
**Fig. 1.** a) Secção vista de frente da amostra de um arenito em representação de uma matriz  $300^2$ . b) Representação em volume da amostra de um arenito em voxel  $300^3$ .



**Fig. 2.** Secção vista de frente de uma amostra sintética em representação de uma  $1600 \times 40$ .



**Fig. 3.** Gráfico do decaimento da magnetização normalizada em imagens vóxeis de tamanhos  $300^3$  ( $\phi=24,63\%$ ),  $200^3$  ( $\phi=25,44\%$ ),  $100^3$  ( $\phi=25,34\%$ ),  $50^3$  ( $\phi=24,74\%$ ),  $40^3$  ( $\phi=25,04\%$ ),  $30^3$  ( $\phi=22,25\%$ ),  $20^3$  ( $\phi=17,32\%$ ),  $10^3$  ( $\phi=29,03\%$ ),  $9^3$  ( $\phi=31,628\%$ ) e  $5^3$  ( $\phi=48,8\%$ ).



**Fig. 4.** Decaimento da magnetização normalizada em imagens vóxeis. a) Corresponde a imagem a) (linha amarela) e b) (linha vermelha) da Fig. 3. b) Corresponde a imagem c) (linha amarela) e d) (linha vermelha) também da Fig. 3.